



Curso de Postgrado 2015 Especialista en TECNOLOGÍAS SIN ZANJA

Madrid
Del 14 de octubre al 12 de noviembre de 2015

Núm. Ref. M7-2.

ASPECTOS GENERALES DE LA PERFORACIÓN HORIZONTAL DIRIGIDA

Víctor Yepes Piqueras

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos – Profesor Titular de Universidad / Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universitat Politècnica de València
vyepesp@cst.upv.es

RESUMEN: El objetivo de esta comunicación consiste en describir los aspectos generales del procedimiento constructivo denominado “Perforación Horizontal Dirigida” PHD, o técnicas HDD en inglés (*Horizontal Directional Drilling*). Esta técnica permite colocar tubos, conductos y cables en la mayoría de los diámetros habituales y en longitudes de más de un kilómetro sin necesidad de abrir zanjas. Existe un abanico de máquinas que permiten su especialización en todo tipo de trabajos, desde perforaciones en espacios reducidos a trabajos de grandes diámetros y distancias. Casi todas las máquinas utilizan un fluido de perforación. La técnica se inicia con una perforación piloto guiada, posteriormente se ensancha la perforación tirando la máquina con un escariador y tras ella, se arrastra la tubería. Las máquinas han mejorado tanto en potencia como en diámetros de instalación disponibles, habiendo bajado el coste hasta ser competitivo con las técnicas de excavación con zanja. Tras realizar una descripción general de la técnica y sus orígenes históricos, se describen los métodos constructivos, las máquinas de perforación, una descripción de la perforación asistida por fluidos, la perforación en seco, los sistemas de navegación y guiado, el equipamiento auxiliar y otros puntos de interés.

Palabras Clave

Perforación Horizontal Dirigida; Tecnologías Sin Zanja; Perforación asistida por fluidos; Fluidos de perforación; Sistemas de guiado.

1. INTRODUCCIÓN

Muchos servicios y canalizaciones se encuentran en zonas urbanas congestionadas. Su instalación, renovación o rehabilitación con métodos tradicionales de apertura de zanjas suponen grandes problemas e inconvenientes a la población. Las tecnologías sin zanja (*trenchless*) son a menudo económicamente más efectivas que las tecnologías de excavación con zanja (Yepes, 2014). Los plazos más cortos de ejecución, una mayor calidad en la construcción, un menor número de restricciones externas como el tráfico o el medio ambiente y la progresiva reducción de costes, está consolidando y extendiendo la tecnología de construcción sin zanja a nivel mundial. Por ejemplo, Tighe et al. (2002) afirman que la vida de un pavimento flexible se reduce aproximadamente el 30% de si se le abre una excavación. Además, los costes de mantenimiento y rehabilitación de dicho pavimento se incrementan notablemente. Por otra parte, son técnicas de bajo impacto ambiental pues evitan alteraciones en los biotopos naturales y en la afectación de la vida superficial. De hecho, Allouche et al. (2000) consideran que es el segmento de la industria de la construcción de las tecnologías sin zanja que más está creciendo. Cerca del 15% de las nuevas instalaciones subterráneas en Alemania se realizan con técnicas sin zanja (Bayer et al., 2005). Ma y Najafi (2007) explican el acelerado desarrollo de estas técnicas en China.

La Perforación Horizontal Dirigida PHD (HDD, de su acrónimo en inglés *Horizontal Directional Drilling*) para colocar nuevas tuberías sin zanja surgió de la fusión de las tecnologías empleadas en la captación de agua y del petróleo. Resulta sorprendente descubrir que Leonardo da Vinci inventó, en el siglo XV, la primera máquina de perforación horizontal que servía para introducir tuberías de madera (Figura 1). La primera instalación con PHD se realizó en 1971 con una tubería de acero de 180 mm para cruzar el río Pájaro cerca de Watsonville, California. Hoy es una técnica que se ha generalizado para franquear obstáculos como ríos, carreteras y zonas complicadas de atravesar mediante una excavación convencional. También se utiliza en las obras municipales para las conducciones de agua potable, gas natural, fibra óptica, cableados eléctricos, alcantarillado y similares cuando hay que cruzar edificios o calles.

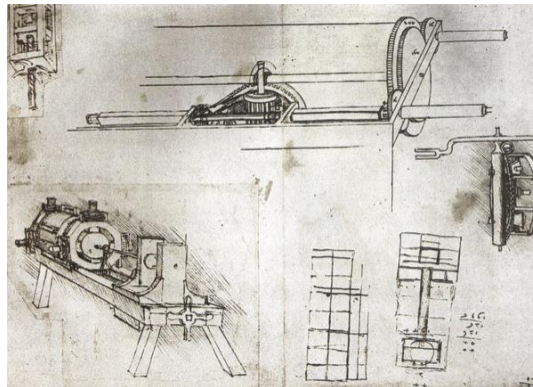


Figura 1. Máquina de perforación horizontal ideada por Leonardo da Vinci, antes de 1495. Fuente: <http://trenchless-australasia.com/>

Lubrecht (2012) analiza las ventajas medioambientales de las técnicas PHD usadas en la descontaminación de suelos. Sin embargo, Ariaratnam y Proszek (2006) recuerdan los desorbitantes costes legales por daños a terceros en los que están incurriendo contratistas negligentes, tanto de PHD como de excavación tradicional. Ello obliga a sistemas muy precisos para detectar obstáculos y otras conducciones para evitar accidentes y explosiones (Jaganathan et al., 2011).

El movimiento de perforación habitualmente se realiza en un plano horizontal que contiene longitudinalmente a la línea de perforación, formada por la cabeza y la sarta de perforación. Al principio, con la técnica PHD en desarrollo, sólo se instalaban tuberías a presión y conductos de cables, sin que la inclinación fuera un parámetro crítico. Hoy las perforadoras cuentan con sistemas de guiado de alta precisión que permiten colocar tuberías de gravedad.

Se podría decir que la PHD es una técnica a medio camino entre la perforación de topo de percusión (*impact moling*) y el microtunelado. PHD proporciona un creciente número de opciones de instalación, pues la trayectoria de la perforación se puede cambiar en cualquier momento para sortear obstáculos superficiales o subterráneos. Las instalaciones habituales utilizan diámetros de 50 a 1200 mm y longitudes de hasta 2000 m. Si bien Allouche et al. (2000) indican que el 72% de las tuberías instaladas con PHD son de diámetros menores o iguales a 100 mm. Los materiales de las tuberías suelen ser de polietileno de alta densidad (PEAD), cloruro de polivinilo (PVC), acero y hierro dúctil. La fuerza de tiro se emplea para clasificar los sistemas PHD, pues está relacionado con el tamaño de máquina necesario, el diámetro del conducto a instalar y la longitud de perforación. Ariaratnam y Allouche (2000) proporcionan un buen compendio de recomendaciones y buenas prácticas relacionadas con esta técnica.

2. PROCESO CONSTRUCTIVO DE LA OBRA

Al igual que ocurre con cualquier procedimiento constructivo, la PHD tiene sus etapas de planificación, ejecución y control (Pellicer et al., 2014). El proceso de instalación de una tubería o canalización mediante PHD comienza con un estudio previo con el objeto de elegir la mejor máquina y útiles para un caso concreto. Se incluye la topografía de la zona y un estudio geotécnico que determine el tipo de terreno. No menos importante es detectar con precisión los servicios existentes en el subsuelo mediante un georadar e incluso analizar rutas alternativas. A continuación se debe adecuar la zona de trabajo para el emplazamiento de los equipos, tanto en el inicio de la perforación como en la salida. No se debe subestimar la planificación. Por cada día de trabajo de campo debería dedicarse un mínimo de dos días de planificación.

La etapa de estudios previos debería centrarse en dos aspectos que se consideran fundamentales:

- a) La naturaleza intrínseca del proceso de construcción que implica:
 - El corte de las formaciones del suelo y su incorporación a los fluidos de perforación
 - El mantenimiento continuo y estable de las paredes de la perforación
 - El transporte del detritus suspendido en la mezcla para permitir la instalación de la tubería
- b) El trazado de la perforación, que deberá centrarse en el obstáculo a cruzar, considerando especialmente las condiciones geotécnicas e hidrológicas (Figura 2), así como identificar el radio de curvatura de las barras de perforación y los esfuerzos máximos admisibles.

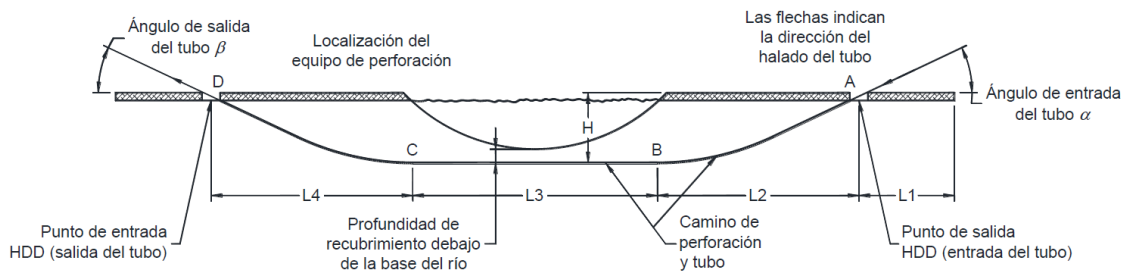


Figura 2. Esquema de perforación PHD. Fuente: Guía Técnica Colombiana GTC 231

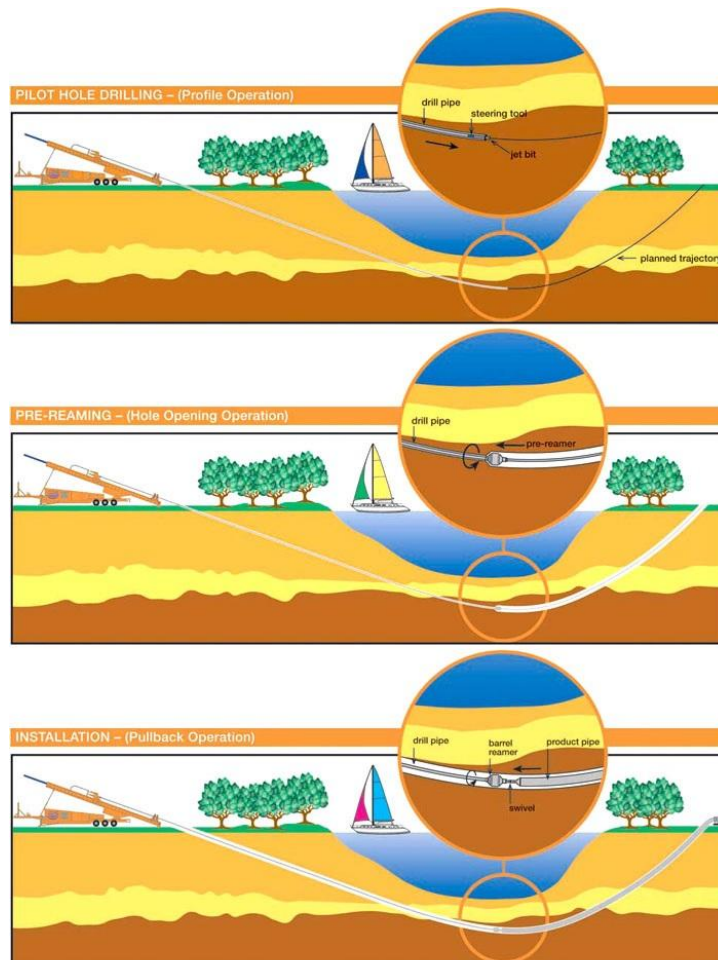


Figura 3. Fases en la ejecución de una PHD. Fuente: <http://tracksonhorizontaldrilling.com.au/directional-drilling-presents-top-solution/>

La instalación propiamente dicha de las tuberías o los conductos se realiza en varias fases (Figura 3). Primero se perfora un taladro piloto; a continuación se ensancha dicha perforación de forma concéntrica en sentido contrario al de la perforación piloto (Figura 4). En ese momento la máquina tira y la tubería se engancha al escariador para alojarla en su posición definitiva.



Figura 3. Cabeza de perforación y escariador. Imágenes de Catalana de Perforacions

La perforación piloto constituye la siguiente fase del proceso tras los estudios previos y el emplazamiento de la maquinaria. Se trata de perforar con un cabezal direccionable con un varillaje especial que admite cambios de orientación. Su diámetro dependerá de la maquinaria utilizada y está relacionada con el tamaño de las barras de perforación y de las brocas de perforación. Los aspectos más relevantes a considerar son las posibles obstrucciones y los radios de curvaturas. Un sistema de navegación guía la cabeza de perforación. Lo habitual es que el varillaje permita la entrada de lodos, que pueden inyectarse a presión para mejorar la perforación. Los lodos arrastran el detritus hacia el exterior. En el caso de terrenos duros se puede utilizar un motor de lodos (*mud-motor*) que acciona el cabezal de perforación.

Tras la perforación piloto se realiza la operación de ensanche, normalmente en sentido inverso, tirando de un escariador. El agrandamiento puede hacerse de una vez o en fases sucesivas hasta alcanzar el diámetro necesario. Es habitual que el diámetro final sea el doble del de la tubería a instalar. Un aspecto clave es el terreno y su estabilidad, pues va a condicionar el uso del ensanchador. Así, en terrenos blandos se emplean ensanchadores tipo *flycutter* o barriles, mientras que en terrenos duros o roca se necesitan ensanchadores especiales con protecciones de carburo de tungsteno. Existen escariadores cortadores, que corta trozos pequeños de material que se mezclan con el fluido de perforación; el escariador compactador, donde los recortes se compactan; y los mixtos, donde los recortes se compactan y se mueven.

Por último, la tubería se alinea y se fija justo detrás del ensanchador y se introduce, de una sola vez, en el interior de la perforación tirando de ella. Para facilitar la operación los lodos lubrican las paredes de la perforación para reducir el rozamiento. Cuando se recoge el varillaje, la instalación ya está terminada.

Las recomendaciones generales para la ejecución de PHD pasarían por normalizar los métodos de trabajos para aumentar rendimientos y reducir costes, establecer sistemas de control que garanticen la seguridad y la calidad de los trabajos y establecer un sistema capaz de rechazar, corregir o aceptar las desviaciones que se puedan dar.

3. MÉTODOS DE INSTALACIÓN

El procedimiento habitual es la perforación asistida con fluidos. En este caso, la cabeza se empuja por una sarta de perforación a través del terreno. El fluido se bombea por el interior de la tubería que forma la sarta de perforación y retorna por el espacio que existe entre la sarta y las paredes de la perforación, con el detritus correspondiente, por lo que debe reciclarse para volver a utilizarse (Figura 5). Hay máquinas autónomas que llevan consigo los tanques de mezcla y las bombas del fluido, aunque en otras son sistemas independientes.

El uso de la perforación con lodos es frecuente, pues además de contener las paredes, permite el transporte del detritus en suspensión al exterior, además de la lubricación y refrigeración de la cabeza de corte. Asimismo, estabilizan la perforación piloto hasta que se inicia su ensanche. Los fluidos de perforación suelen ser mezclas de bentonita y agua, aunque hoy existe una tendencia creciente en el uso de polímeros. Hay que prever en suelos

porosos o fracturados una pérdida de fluidos significativa. Cuando se trata de perforar terrenos duros y roca, se pueden utilizar conjuntos de fondo, BHA (*bottom hole assembly*), que es la parte inferior de la sarta de perforación que se extiende desde un tricono de perforación al varillaje. El BHA se acciona mediante un motor de lodos, que utiliza la potencia hidráulica del fluido de perforación.



Figura 5. Fluido de perforación y central de tratamiento de lodos. Imágenes de Catalana de Perforacions

En equipos pequeños se puede utilizar la percusión para complementar el empuje y la rotación de la cabeza de perforación, sobre todo en terrenos heterogéneos o inclusiones duras. El martillo puede estar en cabeza o bien en la máquina de superficie. Sin embargo hay que tomar precauciones, pues este sistema puede dañar la sarta de perforación y los equipos electrónicos de guiado. También se pueden proyectar fluidos a alta presión (*fluid jet boring*) en la cabeza perforadora. Puede proyectarse agua o una mezcla de fluidos de perforación. El ángulo de ataque permite disgregar el terreno y facilitar el guiado. Se usa este sistema en suelos más bien blandos.

Otra posibilidad consiste en perforar en seco o con pequeñas cantidades de agua o lodos, aunque se reserva para diámetros moderados y condiciones favorables del terreno. Las máquinas son más compactas y sencillas que las de fluidos. Estas máquinas, aparte del empuje y la rotación, emplean un martillo neumático en cabeza para penetrar y compactar el terreno. Es un concepto parecido al de un topo de percusión (Figura 6). De la misma forma que en las máquinas de fluidos, la cabeza del martillo está angulada para dirigir la perforación parando la rotación en una orientación determinada.

La direccionabilidad de la perforación se consigue combinando la geometría de la broca de corte, con el efecto “rotación-empuje” o “no rotación-empuje” y gracias a la flexibilidad de la barra de perforación, que se adapta a los radios de curvatura.



Figura 6. Cabeza de percusión de roca para equipos PHD. Imagen de Terra Trenchless Technologies

4. MAQUINARIA DE PERFORACIÓN Y ELEMENTOS AUXILIARES

Actualmente existe una gran variedad de máquinas empleadas en la PHD. En la Tabla 1 se recoge una clasificación en función de la fuerza máxima de tiro, el par máximo y el peso (IbSTT, 2013). Más del 90% de las máquinas se pueden clasificar como pequeñas o medianas, con una fuerza máxima de tiro de 250 kN. Con estas características, se pueden colocar diámetros que oscilan entre los 50 mm y los 2200 mm, e incluso llegar a 3 km de conducción si se dan las circunstancias favorables. Aunque las máquinas estándar y más versátiles del

mercado suelen tener 500 kN de tracción, las mayores tiran unos 2000 kN. Resulta interesante en este sentido el trabajo de Gierczak (2014) donde se realiza una valoración cualitativa de los riesgos inherentes a los proyectos PHD. Además, estas máquinas presentan una gran variedad de sistemas de guiado, cabezas de perforación, de ensanchamiento y otros accesorios (Figura 7).

Tabla 1. Clasificación de máquinas para la perforación horizontal dirigida (IbSTT, 2013).

Tipo	Fuerza máxima de tiro (kN)	Par máximo (kN)	Peso (t)
Mini		< 10	< 10
Midi	> 150 hasta 400	10 – 30	10 – 25
Maxi	> 400 hasta 2500	30 – 100	25 – 60
Mega	> 2500	> 100	> 60



Figura 7. Mandriles de cabeza de tiro. Imagen de Terra Trenchless Technologies

Las pequeñas acometidas utilizan sistemas Mini-PHD (Figura 8) en las que la dirección de la cabeza de perforación se logra gracias al corte en bisel que presenta la propia broca. En los sistemas Maxi-PHD se utiliza una camisa doblada para desviar el eje del cabezal de corte, además de un tubo de lavado (“washover”) o una camisa con un gran diámetro interno, dentro de la que se desliza la sarta de perforación. A pesar de la gran variedad de máquinas y fabricantes, los equipos están montados sobre tráiler, sobre orugas o por módulos. El sistema modular suele ser la mejor opción para los equipos de mayor potencia, por su facilidad y rapidez de acoplamiento. Para obras de fácil acceso y para facilitar el transporte, lo mejor sería montar el equipo sobre un tráiler, pero si tenemos problemas de movilidad, mejor sería montarlo sobre orugas.

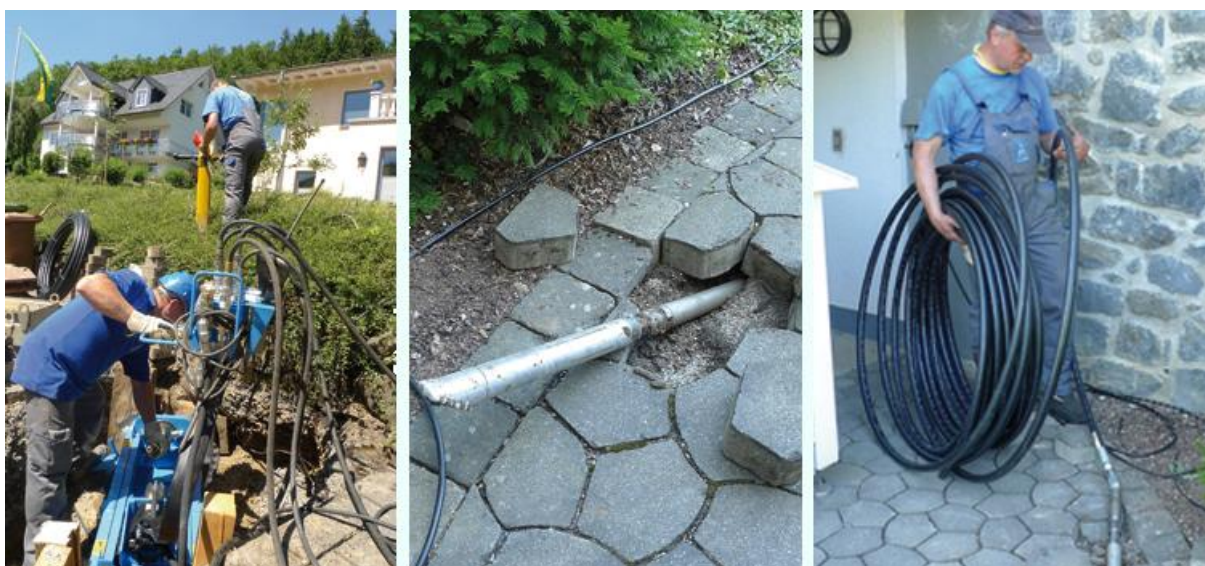


Figura 8. Mini-PHD para acometidas modelo GRUNDOPIT. Imágenes de Sistemas de Perforación S.L.U.

Los rendimientos de las máquinas PHD dependen del tipo de terreno (ver Tabla 2), pero también de aspectos gerenciales, medioambientales o de las condiciones de la tubería. Zayed y Mahmoud (2013) analizan todos los factores que influyen en la productividad. Predecir la producción y los costes que va a tener un equipo de estas características puede ser complejo (Yepes, 2015); en este sentido Zayed y Mahmoud (2014) proponen técnicas basadas en la lógica difusa para su predicción.

Tabla 2. Valoración de la aplicabilidad de la técnica PHD en función del material (Hair, 1994).

Tipo de material	% en peso de las gravas	Aplicabilidad de la técnica PHD
Arcilla muy blanda a muy fuerte, con presencia de fracturas por desecación	-	Buena a excelente
Arena muy suelta a muy densa con o sin trazas de gravas	0 a 30	Buena a excelente
Arena poco gravosa de muy suelta a muy densa	30 a 50	Marginalmente aceptable
Arena gravosa de muy suelta a muy densa	50 a 85	Cuestionable
Grava de muy suelta a muy densa	85 a 100	Inaceptable
Roca	-	Excelente a inaceptable

Así, lo más favorable son arcillas homogéneas, mientras que los materiales granulares presentan problemas de estabilidad, sobre todo bajo nivel freático. Además, las gravas pueden acelerar el desgaste de la cabeza de perforación. Wang y Sterling (2007) han estudiado el comportamiento de la PHD en arenas flojas o mezclas de arenas y gravas, que son los terrenos más problemáticos. En el caso de roca, las máquinas deben contar con motores de lodos que accionen las cabezas cortadoras. Existen incluso máquinas con doble varilla en el que el tubo interior hacer rotar la cabeza cortadora de roca y el exterior proporciona la dirección de perforación; sin embargo, estas máquinas son de pequeño diámetro y longitud de perforación. Otra opción es combinar la percusión con el empuje y la rotación.

En cuanto al emplazamiento de las máquinas, éstas se instalan en superficie, aunque en ocasiones se implantan en un foso. Las de superficie se desplazan mediante orugas, aunque si son muy grandes a veces se requieren medios de transporte. Con todo, son necesarios pequeñas excavaciones para conectar los extremos de los tramos de tubería. Las máquinas emplazadas en fosos se usan normalmente para tramos cortos y rectos, con ligeras desviaciones. Esta circunstancia también restringe la longitud de la sarta de perforación.

Las máquinas PHD presentan dos características comunes, un soporte que empuja la sarta de perforación para la perforación piloto y luego tira de ella y del tubo durante el ensanchamiento (Figura 9), y un motor que hace girar la sarta de perforación, junto con la cabeza de perforación o de ensanche. El empuje suele ser hidráulico, y la inclinación del soporte está inclinada entre 10° y 20° respecto a la horizontal. Si la máquina se emplaza en un foso, la reacción necesaria la proporcionan las caras de la excavación. Las máquinas de superficie se anclan al suelo para su estabilización.



Figura 9. Conexión del escariador a la tubería. Imagen de Apollo Trenchless, Inc.

La sarta de perforación está formada por tubos que están sometidos a grandes esfuerzos, tanto de tracción como de compresión por el empuje y tiro de la máquina, así como de torsión por el par de rotación. Además deben ser flexibles para adaptarse a los cambios de dirección de la perforación y ligeros para facilitar su transporte. Y por supuesto, resistentes a la abrasión y al desgaste. Cheng y Polak (2007) presentan un modelo teórico para el dimensionamiento de las tuberías y Yang et al. (2014) proporcionan un modelo dinámico determinar los

esfuerzos de tiro. Las máquinas emplazadas en superficie usan tubos de entre 3 y 9,6 m de longitud, mientras que las situadas en un foso requieren tramos más cortos, entre 0,3 y 1,5 m. Estos tramos suelen roscarse entre sí, aunque también hay conexiones tipo bayoneta. La tubería se incorpora a la perforación por tramos cargándose por un sistema automático de la máquina (Figura 10). Los tramos se pueden roscar o desenroscar de forma automática para acelerar la producción y seguridad de las operaciones.



Figura 10. Sistema de carga de tramos de tubería. Imagen de Zemin Arastrima Merkezi, Corp.

5. SISTEMAS DE NAVEGACIÓN

El desarrollo de la tecnología PHD se ha basado fundamentalmente en las innovaciones realizadas en los sistemas de navegación y seguimiento de la perforación. La navegación permite conocer con precisión la localización de la punta de perforación. Para controlar la dirección y profundidad de la cabeza, se le coloca en su interior o junto a ella una sonda que emite señales que se recogen en superficie. Este sistema vía radio se denomina “Walk-over”, que incluso es capaz de capturar las señales sin acceso directo sobre el transmisor; es un sistema muy utilizado en la PHD, sobre todo en trabajos pequeños y medianos.

Sin embargo, a veces resulta complicado seguir en superficie al transmisor, como por ejemplo en un río; en estos casos se puede utilizar un cable conectado a la cabeza para el guiado, sería el sistema de cable “Wire-line”, utilizado también cuando se requiere una mayor precisión. Existe asimismo la posibilidad de anular el efecto de campos magnéticos y eléctricos cuando se atraviesan elementos que interfieren las señales. Otros sistemas, denominados “Gyro compass”, utilizan la magnetometría para la localización; estos giroscopios trabajan independientemente del campo magnético terrestre y por tanto determinan de forma precisa la dirección del eje de perforación. Li (2013) explica la monitorización de una tubería de gas durante su ejecución.

Todos estos sistemas de navegación se encuentran asistidos por ordenador para el correcto control de la dirección. La Tabla 3 resume los diferentes procedimientos de navegación con detalles de los campos de utilización (IbSTT, 2013).

Tabla 3. Diferentes procedimientos de navegación de PHD (IbSTT, 2013).

Sistemas de navegación		Profundidad máxima de perforación	Accesibilidad del suelo por encima del eje de perforación necesario	Interferencia debida a campos magnéticos
Walk-Over		≈ 20 m	Si	Si
Wire-Line	Sin campo magnético artificial	> 100 m	No	Si
	Con campo magnético artificial	≈ 50 m	Si	Ligero
Gyro compass		> 100 m	No	No

8. CONCLUSIONES

La Perforación Dirigida Horizontal PHD constituye una técnica que presenta claras ventajas en la instalación de tuberías, conducciones o cables en medios urbanos o para superar barreras como carreteras, ríos, etc. Sus costes actualmente son muy competitivos, especialmente si se tiene en cuenta los costes indirectos que suponen las molestias e interrupciones de servicios que plantea la excavación en zanja tradicional. Son posibles conducciones de una gran variedad de diámetros y longitudes de perforación que pueden superar fácilmente el kilómetro. Los procedimientos actuales de navegación y guiado de la perforación están asistidos por ordenador y permiten una elevada precisión, capaz incluso de instalar tuberías que funcionan por gravedad, donde es fundamental el control de la inclinación. Sin embargo, esta tecnología necesita, para garantizar su éxito en plazos, rendimientos y seguridad, de un elevado grado de especialización, pues la elección del equipo adecuado, el manejo del sistema de guiado, el mantenimiento del equipo y la planificación y estudio de los trabajos requieren formación y experiencia.

9. REFERENCIAS

Abdollahipour, S., Jeong, D., Burman, R., and Gunsaulis, F. (2012). Performance Assessment of On-Grade Horizontal Directional Drilling. *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 138, No. 3, pp. 458–468.

Allouche, E., Ariaratnam, S., and Lueke, J. (2000). Horizontal Directional Drilling: Profile of an Emerging Industry. *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 126, No. 1, pp. 68–76.

Ariaratnam, S. and Beljan, I. (2005). Postconstruction Evaluation of Horizontal Directional Drilling Installations. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Volume 10, No.2, pp. 115-126.

Ariaratnam, S. T., and Allouche, E. N. (2000). Suggested practices for installations using horizontal directional drilling. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Volume 5, No. 4, pp. 142-149.

Ariaratnam, S. T., and Proszek, J. (2006). Legal consequences of damages to underground facilities by horizontal directional drilling. *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, Volume 132, No. 4, pp. 342-354.

Baik, H., Abraham, D. M., and Gokhale, S. (2003). A decision support system for horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 18, No. 1, pp. 99-109.

Baumert, M. E., Allouche, E. N., and Moore, I. D. (2004). Experimental investigation of pull loads and borehole pressures during horizontal directional drilling installations. *Canadian Geotechnical Journal*, Volume 41, No. 4, pp. 672-685.

Bayer, H.J. (Editor) (2005). *HDD Practice Handbook*. Vulkan-Verlag, Essen, Germany

Cheng, E., and Polak, M. A. (2007). Theoretical model for calculating pulling loads for pipes in horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 22, No. 5-6, pp. 633-643.

Gierczak, M. (2014). The qualitative risk assessment of mini, midi and maxi horizontal directional drilling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 44, pp. 148-156.

Hair, C.W. (1994). *Site Investigations Requirements for Large Diameter HDD Projects*. Bton Rouge, Louisiana, New Advances in Trenchless Technology.

IbSTT Asociación Ibérica de Tecnología SIN Zanja (2013). *Manual de Tecnologías Sin Zanja*.

Jaganathan, A. P., Shah, J. N., Allouche, E. N., Kieba, M., and Ziolkowski, C. J. (2011). Modeling of an obstacle detection sensor for horizontal directional drilling (HDD) operations. *Automation in Construction*, Volume 20, No. 8, pp. 1079-1086.

Li, S. (2013). Construction monitoring of a municipal gas pipeline during horizontal directional drilling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 4, No. 4, 04013005.

- Liu, T., and Wang, B. (2014). Guidance method in HDD based on rotating magnetic field. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Volume 52, No. 1, pp. 71-75.
- López-Jimeno, C., López-Jimeno, E., Ramírez, A., and Toledo, J.M. (2000). *Manual de sondeos. Tecnología de perforación*, Madrid.
- Lubrecht, M. D. (2012). Horizontal directional drilling: A green and sustainable technology for site remediation. *Environmental Science & Technology*, Volume 46, No. 5, pp. 2484-2489.
- Lueke, J. S., and Ariaratnam, S. T. (2005). Surface heave mechanisms in horizontal directional drilling. *Journal of Construction Engineering and Management*, Volume 131, No. 5, pp. 540-547.
- Lueke, J. S., and Ariaratnam, S. T. (2006). Numerical characterization of surface heave associated with horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 21, No. 1, pp. 106-117.
- Ma, B., and Najafi, M. (2008). Development and applications of trenchless technology in china. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 23, No. 4, pp. 476-480.
- Pellicer, E., Yepes, V., Teixeira, J.C., Moura, H.P., and Catalá, J. (2014). *Construction Management*. Wiley Blackwell, 316 pp.
- Polak, M.A., and Chu, D. (2005). Pulling loads for polyethylene pipes in horizontal directional drilling: Theoretical modeling and parametric study. *Journal of Infrastructure Systems*, Volume 11, No. 2, pp. 142-150.
- Royal, A.C.D., Polak, M.A., Rogers, C.D.F, and Chapman, D.N. (2010). Pull-in force predictions for horizontal directional drilling. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, Volume 163, No. 4, pp. 197-208.
- Slavin, L. (2010). Parametric Dependency and Trends of HDD Pull Loads. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 1, No. 2, pp. 69-76.
- Slavin, L. M., and Najafi, M. (2012). Effect of pipe stiffness on maxi-HDD pull loads. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 3, No. 1, pp. 22-31.
- Tighe, S., Knight, M., Papoutsis, D., Rodriguez, V., and Walker, C. (2002). User cost savings in eliminating pavement excavations through employing trenchless technologies. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Volume 29, No. 5, pp. 751-761.
- Wang, X., and Sterling, R. L. (2007). Stability analysis of a borehole wall during horizontal directional drilling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 22, No. 5-6, pp. 620-632.
- Yang, C. J., Zhu, W. D., Zhang, W. H., Zhu, X. H., and Ren, G. X. (2014). Determination of pipe pullback loads in horizontal directional drilling using an advanced computational dynamic model. *Journal of engineering mechanics*, Volume 140, No. 8, 04014060.
- Yepes, V. (2014). *Maquinaria para sondeos y perforaciones*. Apuntes de la Universitat Politècnica de València, Ref. 209. Valencia, 89 pp.
- Yepes, V. (2015). *Coste, producción y mantenimiento de maquinaria para construcción*. Editorial Universitat Politècnica de València, 155 pp.
- Zayed, T., and Mahmoud, M. (2013). Data acquisition and factors impacting productivity of horizontal directional drilling (HDD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 33, pp. 63-72.
- Zayed, T., and Mahmoud, M. (2014). Neurofuzzy-based productivity prediction model for horizontal directional drilling. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 5, No. 3, 04014004.
- Zhu, X., Dong, L., and Tong, H. (2013). Failure analysis and solution studies on drill pipe thread gluing at the exit side of horizontal directional drilling. *Engineering Failure Analysis*, Volume 33, pp. 251-264.